

I-B339

空力アドミッタンスの解析と計測

日立造船 正員 田中 洋 エチゾウテック 正員 畑中章秀
日立造船 山口映二 日立造船 正員 植田利夫

1. はじめに 本研究では、揚力及び空力モーメントに関する空力アドミッタンスを取り扱う。揚力に関する空力アドミッタンスとしては薄翼の理論関数である Sears 関数があるが、橋梁断面の空力アドミッタンスは断面形状によっては Sears 関数とかなり異なることが報告されており、2,3 の実験公式も提案されている¹⁾。しかし、これらの実験公式は、種々の断面形状への適用に限界があるものと考えられる。そこで、著者らは非定常空気をを用いた空力アドミッタンスの推定法を提案し、アクティブ乱流発生装置で生成された乱流下での計測値と比較を行った。

2. 非定常空気をを用いた空力アドミッタンスの推定 (1) Sears 関数の拡張 振幅 W の正弦波がガストが飛行速度 U で薄翼を通過する場合に薄翼に働く揚力および空力モーメントは理論的に次式で与えられる。

$$L = \pi \rho c U W e^{i\omega t} \phi(k), M = L \cdot c/4, \phi(k) = [J_0(k) - i J_1(k)] C(k) + i J_1(k) \quad (1)$$

ここに、 ρ : 空気密度, c : 翼弦長, $\phi(k)$: 空力アドミッタンス (Sears 関数), $C(k)$: Theodorsen 関数, $J_0(k)$, $J_1(k)$: 第1種0次・1次ベッセル関数, $k (=b\omega/U)$: 換算振動数, b : 半弦長, ω : 固有円振動数。

ところで、式(1)で与えられる理論空気力は、調和振動する薄翼の非定常空気力理論を応用したものであり、調和振動する場合と正弦波ガストが作用する場合とで薄翼に作用する相対鉛直速度は異なるもののいずれも相対鉛直速度に対する循環揚力は Theodorsen 関数を介して決定される。そこで、著者らは式(1)の薄翼に対する Theodorsen 関数 $C(k)$ をそれと等価な橋梁断面に対する等価 Theodorsen 関数 $C_{eq}(k)$ ²⁾に置き換えることで、式(1)の適用を橋梁断面にも拡張できるものと考えた。その際、橋梁断面は断面形状により揚力作用点が変わるため等価 Theodorsen 関数を揚力及び空力モーメントに対して定義した。また、揚力係数勾配およびモーメント係数勾配も各橋梁断面ごとに異なるためにそれぞれ $dC_e/d\alpha$ と $dC_m/d\alpha$ で与え、式(1)を次式のように拡張した。なお、次式では、翼弦長 c を橋梁幅 B に置き換えている。

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{1}{2} \rho U^2 B \frac{dC_F}{d\alpha} \left(\frac{W}{U} \right) e^{i\omega t} \phi_L(k), M = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \frac{dC_M}{d\alpha} \left(\frac{W}{U} \right) e^{i\omega t} \phi_M(k) \\ \phi_L(k) &= [J_0(k) - i J_1(k)] C_{eq,L}(k) + i J_1(k), \phi_M(k) = [J_0(k) - i J_1(k)] C_{eq,M}(k) + i J_1(k) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 $\phi_L(k)$, $\phi_M(k)$: 揚力及び空力モーメントに対して定義される Sears 関数と等価関数, $C_{eq,L}(k)$, $C_{eq,M}(k)$: 揚力及び空力モーメントに対して定義される等価 Theodorsen 関数。

(2) 等価 Theodorsen 関数の同定 文献4)にならって等価 Wagner 関数 $\Phi_{eq}(\tau)$ と等価 Theodorsen 関数 $C_{eq}(k)$ の関係を以下のように定義する。なお、ここでは紙面の都合上、揚力に関する項のみを記す。

$$\begin{aligned} \Phi_{eq,L}(\tau) &= 1 - c_1 \exp(-c_2 \tau) - c_3 \exp(-c_4 \tau), \tau = U t / b \\ C_{eq,L}(k) &= F_L(k) + i G_L(k), F_L(k) = 1 - \frac{c_1 k^2}{k^2 + c_2^2} - \frac{c_3 k^2}{k^2 + c_4^2}, G_L(k) = - \left[\frac{c_1 c_2 k}{k^2 + c_2^2} + \frac{c_3 c_4 k}{k^2 + c_4^2} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $c_1 \sim c_4$: 未知パラメータ (各橋梁断面固有の値), F_L , G_L : 等価 Theodorsen 関数の実部と虚部。

また、等価 Theodorsen 関数と調和振動時の非定常揚力との関係は次式で与えられる。

$$L_{s,e} = -\pi \rho b^2 U \dot{\alpha} - \rho b U \frac{dC_F}{d\alpha} \left[F_L \left(U \alpha + h + \frac{b}{2} \dot{\alpha} \right) + G_L \left(\frac{U}{\omega} \dot{\alpha} - \omega h - \frac{b\omega}{2} \alpha \right) \right] \quad \begin{matrix} h : \text{上下} \\ \alpha : \text{回転} \end{matrix} \quad (4)$$

本研究では強制加振装置により非定常空気を計測し、Scanlan らが提唱する非定常空気力表記に従い H_i^* および $A_i^{*5)}$ の形で整理する。この時、式(4)から H_i^* と F_L ・ G_L の関係が次式により与えられる。

キーワード : ガスト応答解析, 空力アドミッタンス, Sears 関数, 等価 Theodorsen 関数, アクティブ乱流発生装置

〒559-0034 大阪市住之江区南港北1-7-89 日立造船・橋梁設計部 TEL : (06)6569-0108, FAX : (06)6569-0105

$$H_1^* = -\frac{\widetilde{F}_L}{K}, H_2^* = -\frac{1}{2K} \left[\pi + \frac{\widetilde{F}_L}{2} + \frac{2\widetilde{G}_L}{K} \right], H_3^* = -\frac{1}{K^2} \left[\widetilde{F}_L - \frac{K\widetilde{G}_L}{4} \right], H_4^* = \frac{\widetilde{G}_L}{K}, \left(\widetilde{F}_L = \frac{dC_e}{d\alpha} F_L, \widetilde{G}_L = \frac{dC_e}{d\alpha} G_L \right) \quad (5)$$

ここに、 $K (= fB/U)$: 換算振動数. ここで式 (3) および式 (5) より、 H_i^* はパラメータ $c_1 \sim c_4$ の非線形関数で表されることがわかる. 本研究では、パラメータ $c_1 \sim c_4$ に加えて、静的空気力係数も未知パラメータ c_0 として実験値 H_i^* に適合するように同定した. パラメータ同定には、拡張カルマンフィルター (EK-WGI 法)⁶⁾ を用いた.

3. 空力アドミッタンスの計測値と推定値の比較 本研究では、翼断面 (NACA0012)、同じ辺長比 ($B/D=7.5$) を持つ矩形断面と偏平箱桁断面 (高欄・地覆なし) を用いて、それぞれ一様流中の非定常空気力 (ただし、翼断面のみ乱流中で計測) と乱流中の変動空気力 (模型は静止) を計測した. また、乱流実験では、翼列と平板列から成るアクティブ乱流発生装置を用い、カルマン型スペクトルに適合する乱流 (目標値: $L_u=10\%$, $L_w=5\%$, $L_u=150\text{cm}$, $L_w=75\text{cm}$) を風洞内にシミュレートした⁷⁾.

図1には翼断面、矩形断面および偏平箱桁断面の揚力に関する等価 Theodorsen 関数の算定例を示す. 図中には Theodorsen 関数の R.T.Jones 近似式²⁾ を併記している. 翼断面・矩形断面ともに理論値にほぼ対応しているが、偏平箱桁断面は理論値とは異なる傾向にある. 図2および図3は各断面の揚力及び空力モーメントに関する空力アドミッタンスを示したものである. 各図には計測値と上述の等価 Theodorsen 関数を用いた推定値を併記している. 翼断面については計測値・推定値ともに理論式にほぼ一致していることが分かる. それ以外の断面についても、 $B/D=7.5$ の空力モーメントを除いて、計測値と推定値はよく対応している. 矩形断面 $B/D=7.5$ の空力モーメントに関する推定値は、計測値と同様に凸形状となっているものの絶対値に差が認められる. この原因として一様流中と乱流中の非定常空気力の違いや理論で想定している揚力分布の仮定を満足していないなどが挙げられ、今後の検討課題としたい.

4. まとめ 本研究では非定常空気力を用いた空力アドミッタンスの推定法を提案した. そして、計測値と推定値を比較したところ両者はよく対応することが分かった. しかし、矩形断面 ($B/D=7.5$) の空力モーメントについては定性的な傾向は一致するものの絶対値に差が認められた. 今後、乱流中の非定常空気力を用いた推定を行うなどの更なる検討を行う予定である.

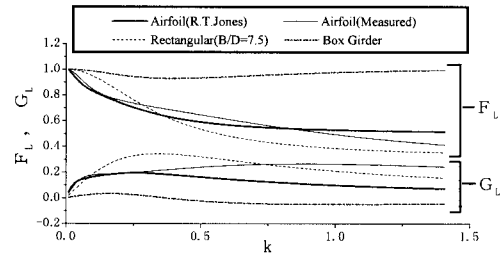


図1 揚力に関する等価Theodorsen関数

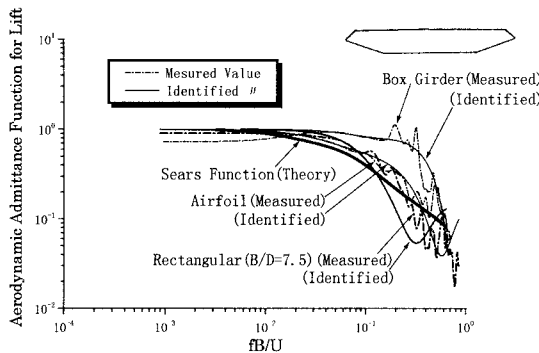


図2 揚力に関する空力アドミッタンス

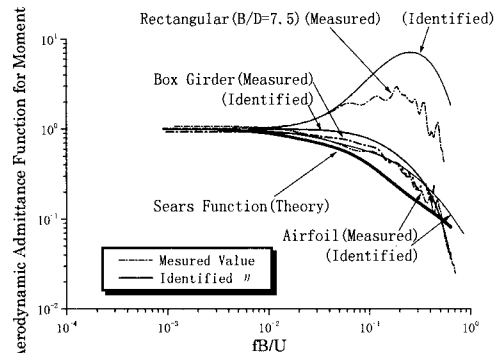


図3 空力モーメントに関する空力アドミッタンス

- 参考文献** 1) E. D. Jancauskas, Ph.D 論文, 1983. 2) Y. C. Fung: The Theory of Aeroelasticity, Dover, 1969. 3) 松本, 白石, 白土, 重高, 新原, 山口, 第12回風工学シンポジウム論文集, 1992. 4) R. H. Scanlan, J. G. Beliveau and K. S. Budlong, ASCE, Vol. 100, No. EM4, 1974. 5) R. H. Scanlan & J. J. Tomko, ASCE, Vol. 97, No. EM6, 1971. 6) M. Hoshiya & E. Saito, ASCE, Vol. 110, No. EM12, 1984. 7) H. Kobayashi, A. Hatanaka and T. Ueda, J. WEIA, 53, 1994.